

Prozesskette zur Faltmontage für miniaturisierte komplexe Optiksyste^me

S. Sdrenka, K. Stein, M. Sabiha, M. Schulz, G. Ziegmann*

Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM)

Email: sebastian.sdrenka@tu-clausthal.de

*H. Grüger**

Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS)

Email: heinrich.grueger@ipms.fraunhofer.de

Abstract

Optische Systeme sind wesentlicher Bestandteil unseres täglichen Lebens. Neben den linsenbasierten axialen Optiksyste^men, wie sie beispielsweise in den meisten Kameraoptiken verwendet werden, bieten nichtaxiale spiegelbasierte Optiksyste^me hohes Potenzial in spektral anspruchsvollen Anwendungen. Dem Vorteil des Fehlens von Linsen-Farbfehlern, wie chromatische Aberration und Absorption in den Linsen steht die komplexe Montage und Justage der Optikkomponenten gegenüber. Hierdurch wurde bislang die breite Markteinführung, beispielsweise für kompakte Nahinfrarotspektrometer in Lebensmittelanwendungen oder Multispektralkameras für die Fahrerassistenz, verhindert.

Ein neuartiger Ansatz des Fraunhofer-Instituts für Photonische Mikrosysteme (IPMS) könnte die bisherigen Einschränkungen beseitigen. Der Ansatz der sogenannten Faltmontage basiert auf der Idee des Faltens von Substraten, einer Idee die beispielsweise in der japanischen Kunst des Papierfaltens „Origami“ verwendet wird. Im technischen Ansatz wird ein planares Substrat mit Biegestrukturen entlang gezielt einstellbarer Biege^linien versehen. Nach der Bestückung der Komponenten mit verfügbaren hochgenauen 2D Bestückungsautomaten wird der dreidimensionale Körper durch Falten des Substrates realisiert, der komplexe Strahlengang in Inneren entsteht automatisch. Wird eine ausreichende Genauigkeit des Substrats, der Bestückung und des Faltprozesses erreicht, sind keine Justageschritte notwendig. In Vorversuchen wurden mit Substraten aus der additiven Fertigung (3D Druck) bereits erfolgreich Kamerasysteme und NIR Spektrometer realisiert. Die grundlegende Eignung von Spritzgussverfahren für die Faltmontage wurde in Kooperation mit dem Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PUK) der TU Clausthal nachgewiesen.

Für die Überführung des technischen Ansatzes in die Volumenfertigung ist die Validierung der Prozesskette zur Faltmontage für miniaturisierte komplexe Optiksyste­me notwendig. Aufbauend auf vielversprechenden Ergebnissen aus Vorversuchen werden wichtige Innovationen angestrebt. Dabei dient das Spritzgussverfahren unter Berücksichtigung spezieller Designrules als volumentaugliches Verfahren für die Substratherstellung mit hoher Präzision sowie Option auf Integration von optischen Funktionsflächen. Neben der Entwicklung eines Spritzguss- und Werkzeugkonzeptes werden zwei stark vereinfachte Funktionaldemonstratoren für auf den Faltmontageansatz aufbauende Systeme realisiert. Eine Multispektralkamera für Pkw-Spiegelfuß zeigt Potenzial für den Einsatz im Bereich der Fahrerassistenzsysteme und ein NIR Spektrometer für mobile Anwendungen in der Landwirtschaft und dem Lebensmittelsektor.

1 Potenzial mikrooptischer Systeme

Wichtige Innovationen haben unsere Gesellschaft nachhaltig verändert. Nach Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik hat sich auch der Trend für miniaturisierte optische Systeme in allen Lebensbereichen durchgesetzt. Hierbei folgen auf miniaturisierte Kamerasysteme, die längst nicht nur auf Mobiltelefone beschränkt sind, jetzt Systemansätze mit steigender Komplexität, beispielsweise LIDAR (Light detection and ranging) für Fahrzeuge oder Spektralanalysesysteme für das Smartphone von morgen (*Abb. 1*).

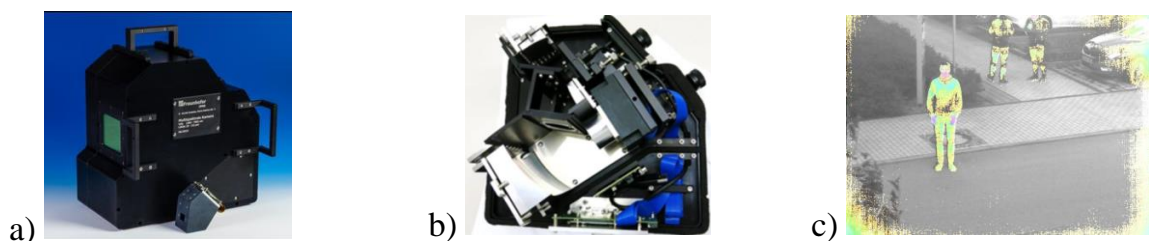


Abb. 1: Multispektralkamera: a) Gehäuse, b) Innenleben und c) Datenverarbeitung

Die Zielanwendungen stellen für die zur Verwirklichung zu entwickelnden Zielsysteme hohe Anforderungen auf: Höchstmögliche Integrationsdichte und Miniaturisierung, Fertigung der Systeme in sehr großen Stückzahlen bei hoher Präzision und mit maximaler Kosteneffizienz. Die Kamera eines jeden modernen Smartphones hat eindrucksvoll belegt, dass diese Anforderungen für axial aufgebaute Optiksyste­me erfüllt werden können. Die fertigungstechnologische Basis sind ultraeffiziente 2D Bestückungsautomaten, die selbst kleinste Bauelemente mit Mikrometerpräzision in Sekundenschnelle positionieren und montieren können (*Abb. 2*). Für komplexe Optikansätze, insbesondere für

außeraxiale Optiken wie sie in künftigen Anwendungen benötigt werden, limitieren oftmals Montageerfordernisse und die Justage der Komponenten die weitere Miniaturisierung, ohne Effizienzverluste in Kauf nehmen zu müssen.

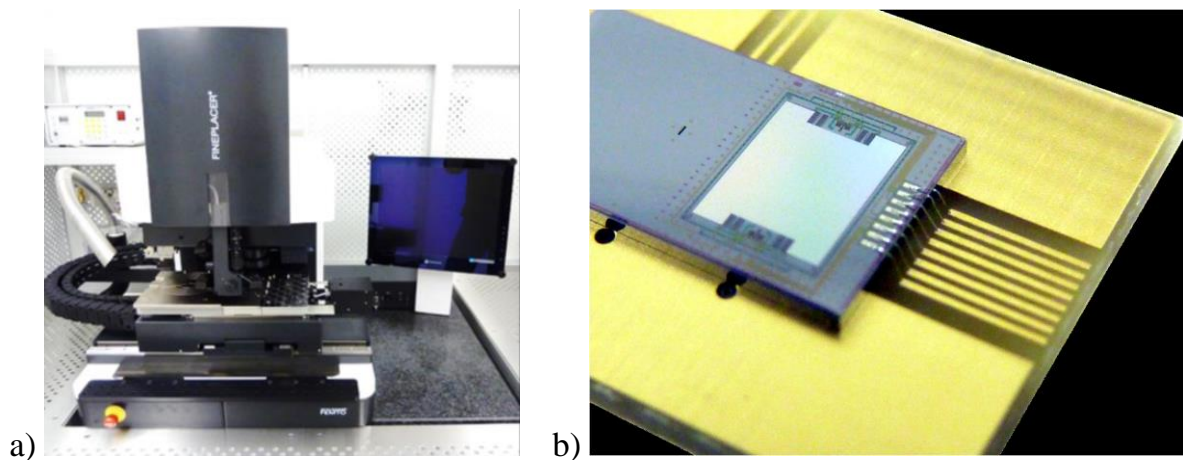


Abb. 2: Hochpräzise 2D Mikromontage: a) Montageequipment Fineplacer FEMTO und b) Chipaufbau mit Justagemarken

Das Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS) hat als führende Einrichtung für miniaturisierte photonische Systeme einen neuen Ansatz für die Integration komplexer Optiksyste \ddot{u} me entwickelt. Dieser als „Faltmontage“ bezeichnete Ansatz transferiert das Problem der dreidimensionalen Montage und Justage auf die etablierte 2D Präzisionsmontage und einen einfachen zusä \ddot{u} tzlichen Arbeitsschritt des Faltens des Optikkörpers. Wie beim Zusammenfalten eines Versandkartons entsteht der 3D Körper aus einem planaren Substrat. Der Strahlengang im Inneren bildet sich selbstständig, sofern die Genauigkeit des Biegevorgangs mit ausreichender Präzision erfolgt. Gerade für die Genauigkeit des Biegevorgangs ist die Klärung von zwei zentralen Fragestellungen auf Basis der bereits erreichten Forschungsergebnisse notwendig.

Das Herstellungsverfahren muss unter Berücksichtigung aller Randbedingungen einen optimalen Wirkungsgrad zwischen großen Stückzahlen und der Fertigungsgenauigkeit bieten. Dabei sind Mikrostrukturierung und Biegetoleranzen für die optischen Funktionsflächen besondere Herausforderungen, die innovativer material- und verfahrenstechnischer Lösungsansätze im Präzisionsbereich bedürfen.

Dem gegenüber steht die Modellierung der Biegestruktur, die nach dem Faltprozess die erforderliche Präzision für die Positionierung der optischen Elemente für den Strahlengang erreichen muss. *Abbildung 3* zeigt den planaren Faltaufbau – orientiert am Origami-Modell – und den Strahlengang im Inneren. Der Strahlengang erfordert für die miniaturisierten optischen Systeme eine maximale Genauigkeit der Oberfläche, um die Signale zu detektieren und die Signalantwort weiter zu geben.

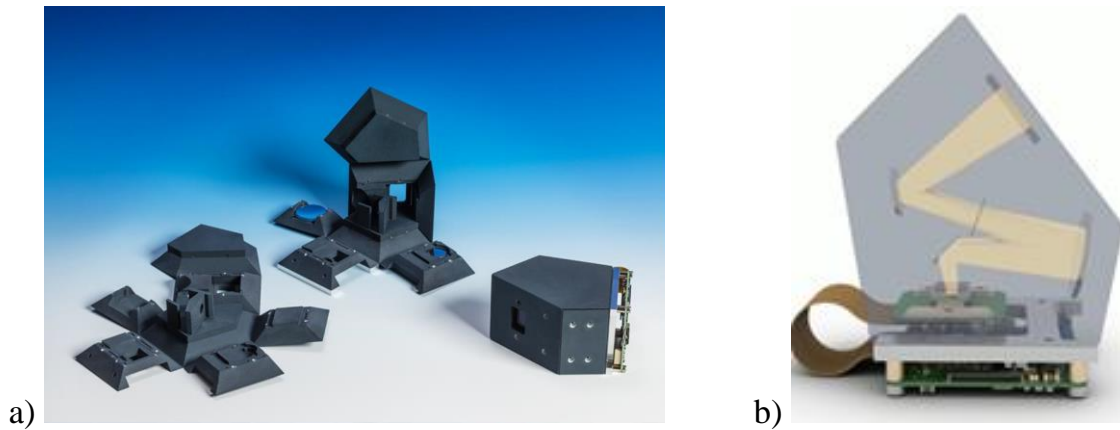


Abb. 3: Systemrealisierung am Beispiel eines gestapelten Spektrometers: a) Optisches System aus Faltmontage und b) schematischer Strahlengang im Inneren

2 Ansatz der Faltmontage

Die Miniaturisierung von komplexen optischen Systemen und insbesondere von off-axis Optiken, also optische Komponenten mit unterschiedlichen optischen Achsen, mit der Faltmontagetechnik ist neu. So gibt es bislang keine bekannte Forschung, die eine Miniaturisierung von beispielsweise Spektrometern über den Ansatz der Faltmontage verfolgt. Im weiter gefassten Verständnis des Faltens existieren Ansätze die sich mit dem Aufbau von Geräten über eine Art Falttechnologie befassen. Hier sind im Bereich der Elektronik unter anderem flexible Leiterplatten zu nennen, die beispielsweise Anwendungen in Katheter finden können. Diese um die Spitze des Katheters gewickelten Leiterplatten nutzen damit den begrenzten Bauraum effektiver aus. Aus dem alltäglichen Leben ist das Falten von Kartons bekannt. Für Transportzwecke der flachen Geometrie reduziert sich der benötigte Platz auf ein Minimum und kann vor Ort in kurzer Zeit zu dem benötigten Behälter gefaltet werden.

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) und mikrooptische Systeme leisten einen wichtigen Beitrag für Innovationen in zahlreichen technischen Gebieten. Das Paradebeispiel hierfür sind Mobiltelefone mit integrierter Kamera. Die Entwicklung der Kameras in den vergangenen Jahren zeigt, dass die Miniaturisierung an Grenzen stößt. Noch kritischer ist die Situation für komplexe Optikdesigns. Die vom Fraunhofer IPMS entwickelte Faltmontage leistet einen wichtigen Beitrag, die heutige Grenze der Miniaturisierung zu durchstoßen und die Integration komplexer optischer Systeme voranzutreiben. Denkbar sind beispielsweise Spektrometer zur Analyse der Frische von Obst und Gemüse oder zur Erkennung des Fruchtreifegrades (Abb. 4). Erste Versuche zeigten bereits vielversprechende Resultate der Technologie.

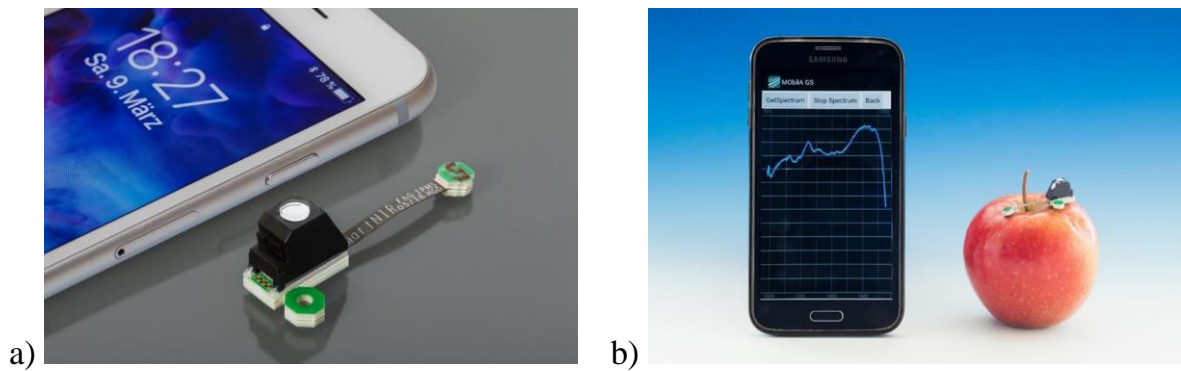


Abb. 4: Miniaturisierung von optischen Systemkomponenten: a) Integration in Mobiltelefon und b) Beispielanwendung für mobile Lebensmittelanalyse

Das Prinzip der Faltmontage ist in der Origami-Technik zu finden, also dem komplexen Falten eines Stücks Papier. Die grundsätzliche Machbarkeit konnte durch den Einsatz additiver Fertigungstechnologien erbracht werden. Im 3D-Druck Verfahren wurden planare Substrate gedruckt, mit präzisionsgefertigten Optiken, Aperturblenden und Detektoren bestückt und anschließend durch Falten des Substrats fertiggestellt. Das Ergebnis waren zwei funktionstüchtige Demonstrationssysteme, eine lichtstarke Kamera für das thermische Infrarot- und ein Nahinfrarotspektrometer.

Additive Fertigungsverfahren eignen sich hervorragend, um mit überschaubarem Aufwand den Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit zu erbringen. Von der Einzelstückherstellung bis hin zur Kleinstserienproduktion ist ein enormes Potential vorhanden. Die Bandbreite an verfügbaren Druckverfahren, -materialien und -systemen bietet zudem einen großen Spielraum, die Konzepte zur Faltmontage erfolgreich zu gestalten.

Die gewünschte Geometrie wird mit entsprechender computergestützter Software modelliert und visualisiert. Das Modell wird für den Druckprozess in ein STL-Datenformat (Standard Triangulation Language) zerlegt. Die Oberfläche des 3D-Körpers wird nun mit sogenannten Dreiecksfacetten dargestellt. Über die Anzahl dieser Dreiecksfacetten wird die Oberflächengenauigkeit definiert. Um gekrümmte oder runde Oberflächen detailliert abzubilden, ist eine starke Verfeinerung der Dreiecksfacetten erforderlich. Dies ist am Beispiel der Kugel dargestellt (Abb. 5). Dabei korreliert die Datenmenge mit der Anzahl der Dreiecksfacetten, was bei der folgenden Verarbeitung einen limitierenden Faktor darstellen kann.

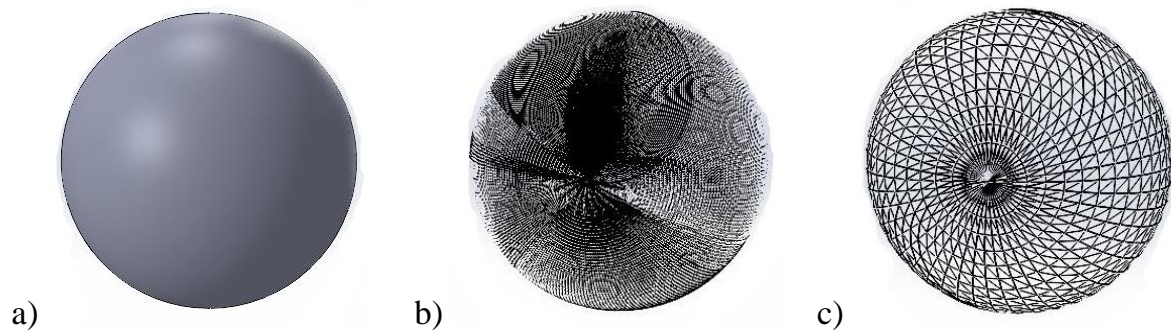


Abb. 5: Schematische Darstellung einer STL-Formatierung: a) Vollkugel mit $d = 1$, b) hoch aufgelöste Anzahl (~ 520.000) an Dreieckfacetten und c) geringe Anzahl (~ 2.300) an Dreieckfacetten

Biegekanten und positionsgenaue Arretierung von optischen Elementen für einen präzisen Strahlengang im Inneren der gefalteten Struktur erfordern einen entsprechend hohen Grad der Abbildungsgenauigkeit und Reproduzierbarkeit. Die Biegekanten selbst müssen den wirkenden Kräften beim Falten mindestens einmalig, besser noch mehrmalig und dauerhaft standhalten. Materialüberbeanspruchung wie Weißbruch ist zwar nicht erwünscht, ist aber zulässig, sofern die optischen Funktionselemente präzise ausgerichtet sind. Materialschädigung in Form von (Mikro-)Rissen und Rissausbreitung bis hin zum Bauteilversagen ist unbedingt zu vermeiden.

3 Herstellung der Biegekanten mittels additiver Fertigung

3.1 Stereolithografie Verfahren

Die Stereolithografie (SLA) zählt zu den Flüssigdruckverfahren (Abb. 6). Bei diesem Verfahren wird ein photoreaktives Polymer im flüssigen niedermolekularen Zustand über den Energieeintrag eines Laserstrahls im UV-Licht Bereich, je nach Drucksystem etwa bei 395 ... 405 nm, schichtweise und punktgenau innerhalb kürzester Zeit ausgehärtet. Die Schichtdicke liegt dabei im Mikrometerbereich, beim eingesetzten Formlabs Form 2 bei 25 ... 300 μm bei einer Laserspotgröße von 140 μm . Diese Werte beeinflussen unmittelbar die minimal erreichbare Abbildungsgenauigkeit. Die zu Grunde liegende chemische Reaktion der Aushärtung ist eine Polymerisation. Die Polymerisationsreaktion ist mit dem Druckprozess allerdings noch nicht abgeschlossen. Die Bauteile haben nach dem Drucken zwar die endgültige Form, dennoch liegen im Bauteil selbst nicht verknüpfte chemische Verbringungen vor, was sich nachteilig auf die Materialeigenschaften, insbesondere die Härte, auswirkt. Über einen Nachhärteprozess können die Materialeigenschaften unter definierten Bedingungen das materialspezifische Optimum erreichen. Haupteinflussfaktoren sind UV-Licht und Temperatur. Wärme regt das Netzwerk dreidimensional verknüpfter Polymerketten zu höherer molekularer

Beweglichkeit an. Das UV-Licht fördert bei einer Wellenlänge von 405 nm die chemische Verbindung freier reaktiver Gruppen. In Summe steigt damit der Grad der Quervernetzungen und verbessert die mechanischen Materialeigenschaften. Auch Tages- bzw. Sonnenlicht kann diesen Effekt bewirken, aufgrund der geringeren Intensität allerdings deutlich langsamer und nicht vollständig.

Technisch betrachtet hängt der Schichtaufbau der gedruckten Struktur also von der Feinheit des Lasers bzw. dessen Bündelung über ein Linsensystem ab. Im Bauraum selbst ist das zentrale Element ein Vorratsbehälter, gefüllt mit lichtempfindlichem Kunstharz, bestehend aus Monomeren, Oligomeren, Photoinitiatoren und ggf. weiteren Additiven, das nach jedem Schichtaufbau durchmischt wird, um eine homogene Verteilung der Harzbestandteile und insbesondere der Photoinitiatoren zu gewährleisten. Die gedruckte Struktur wird im definierten Druckraum über eine bewegliche, absenkbare Plattform um die jeweilige Position verfahren. Dieser Verfahrensablauf durchläuft eine programmierte Schleife, bis das in Schichten zerlegte CAD-Modell und ggf. erforderliche Stützstrukturen gefertigt sind.

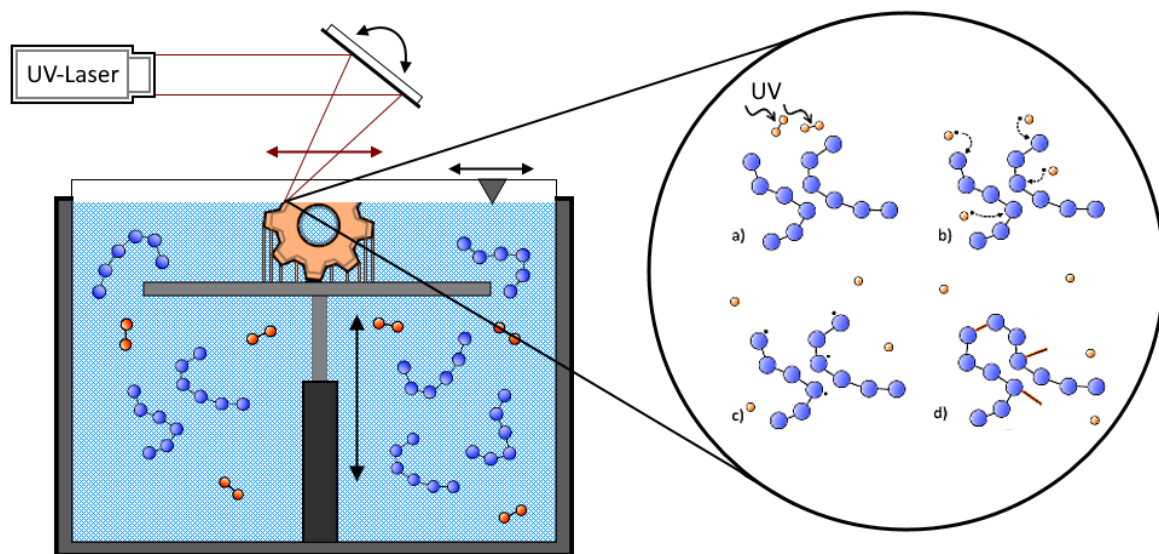


Abb. 6: Schematische Darstellung der Stereolithografie und der Polymerisationsreaktion

Abhängig von der geometrischen Komplexität der CAD-Modelle sind bei diesem Druckverfahren äußere und innere Stützstrukturen für die Stabilität erforderlich. Diese können durch Nachbearbeitung manuell entfernt werden, beeinträchtigen unter Umständen aber die Oberflächenrauigkeit. Um den Nachbearbeitungsaufwand minimal zu halten, bieten eine softwaregesteuerte Minimierung der Stützen sowie eine lokale Verfeinerung am Übergang von Geometrie zu Stütze die Möglichkeit zur Optimierung des Trennprozesses.

3.2 Modellierung der Knickverbindung

Eine besondere Herausforderung für die Faltmontage ist die Knickverbindung, die die wirkenden Kräfte beim Knickvorgang aushalten muss (Abb. 7).

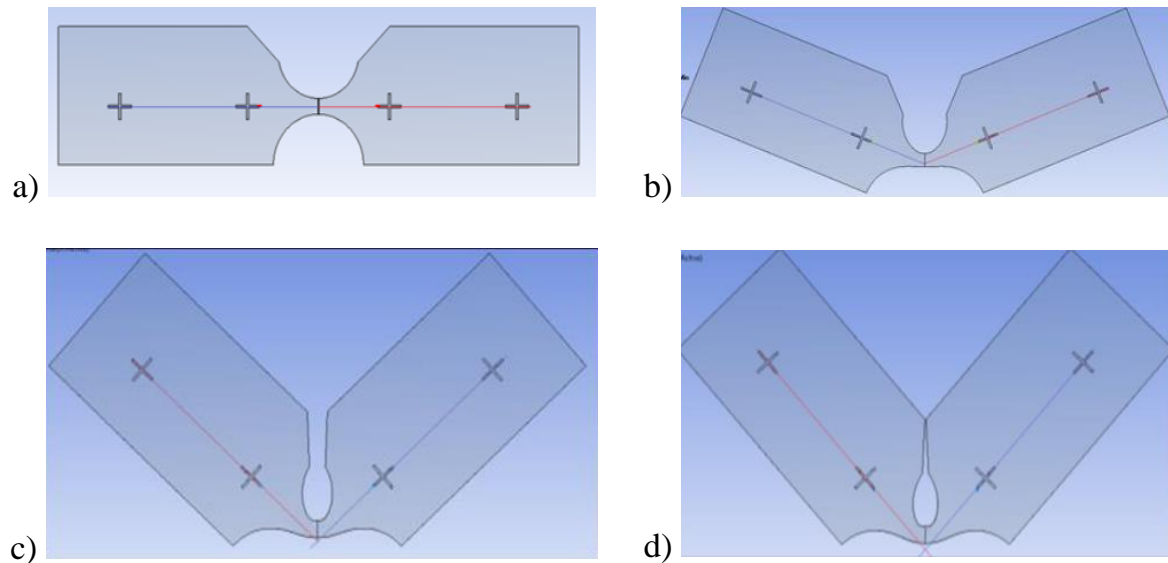


Abb. 7: Simulation der Biegung am Probekörper mit $d_L = 11,0 \text{ mm}$, $d_B = 2,6 \text{ mm}$ und $d_{\text{Knick}} = 0,3 \text{ mm}$: a) $\alpha_1 = 0^\circ$, b) $\alpha_2 = 30^\circ$, c) $\alpha_3 = 45^\circ$ und d) $\alpha_4 = 60^\circ$

Mittels softwareunterstützter Simulation können die Spannungen in den Biegestrukturen und die Verschiebung der Biegelinie numerisch betrachtet werden (Abb. 8). Daraus resultierende Abweichungen im Modell werden in der finalen Auslegung berücksichtigt.

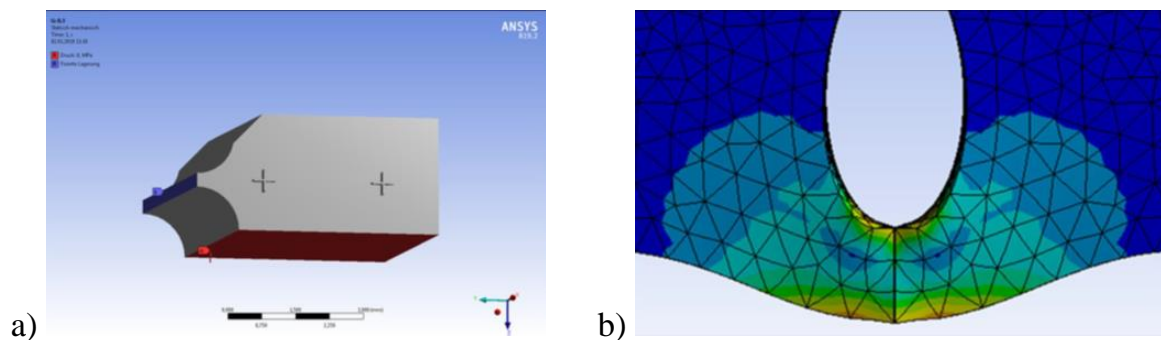


Abb. 8: Simulation der Biegespannung mit $d_L = 11,0 \text{ mm}$, $d_B = 2,6 \text{ mm}$ und $d_{\text{Knick}} = 0,3 \text{ mm}$: a) CAD-Modell des Probekörpers und b) Spannungsverteilung an der Biegekante

3.3 Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung wurden Materialeigenschaften mit Fokus auf das Biegeverhalten von verschiedenen 3D gedruckten Materialien intensiv untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass Materialien aus dem 3D Druck nur sehr begrenzt in der Lage sind, alle hier geforderten Eigenschaften für ein Trägersubstrat zu erreichen, wie mechanische Eigenschaften, Präzision, Oberflächenqualität und Stückzahlleistung (Abb. 9). Moderne

Spritzgussverfahren bieten vielversprechendes Potenzial im Hinblick auf Fertigungsgenauigkeit und Stückzahlleistung. Es sind jedoch materialbezogene Untersuchungen notwendig.

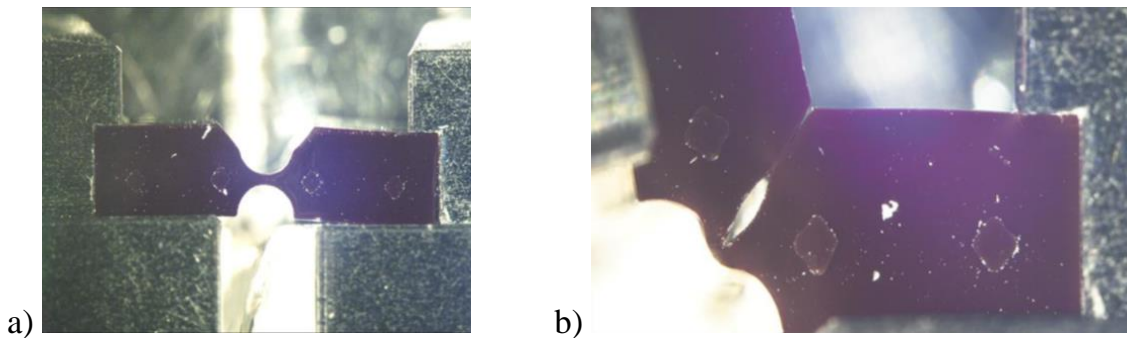


Abb. 9: Biegeversuch am Probekörper mit eigens konstruierter Testvorrichtung: a) Einspannung und b) maximale Biegung

Neben der Definition und der geometrischen Ausbildung Biegekante ist die Abbildungsgenauigkeit der additiven Fertigungsverfahren von höchstem Interesse. Besteht die Möglichkeit geometrische Strukturen auf der Oberfläche präzise – im einstelligen Mikrometerbereich – und reproduzierbar abzubilden, kann der Strahlengang im Inneren des optischen Systems gezielt eingestellt werden. Im Hinblick auf Positionierung und Wellenlängenbereich wird durch die Integration von optischen Funktionsflächen und passgenaue Oberflächenstrukturen in den Substraten das Funktionsspektrum der Faltmontage noch attraktiver.

Ein eigens entwickelter, geometrisch komplexer Testkörper mit präzisen und positionsgenauen Oberflächenstrukturen zur gezielten Steuerung eines Strahlengangs im Inneren eines gefalteten Substrats hat im Formlabs-Druckverfahren, mit dem Modell Form 2, zwar noch nicht die gewünschte Abbildungsgenauigkeit der modellierten Strukturen erzielt, zeigt aber das Potenzial dieser sich stetig weiter entwickelnden Herstellungstechnologie (*Abb. 10*). Aus heutiger Sicht agiert dieses Verfahren an der unteren Grenze der Abbildungsgenauigkeit ($\leq 500 \mu\text{m}$) noch unzureichend, speziell scharfe Kanten, Winkelübergänge und Zwischenräume werden im realen Modell nicht ausreichend detailliert abgebildet (*Abb. 11*). Allerdings entwickelt sich die additive Fertigungstechnologie mit einer rasanten Geschwindigkeit weiter, so dass bereits das Nachfolgermodell, der Form 3, ein besseres Ergebnis mit Blick auf die Abbildungspräzision verspricht. Darüber hinaus wird das Spektrum der zur Verfügung stehenden Drucktechnologien, einsetzbaren Materialien und Geräten immer breiter, so dass definierte Mikrostrukturen auf der Oberfläche zur gezielten Steuerung eines Strahlengangs im Inneren eines Faltsubstrates perspektivisch herstellbar sind.

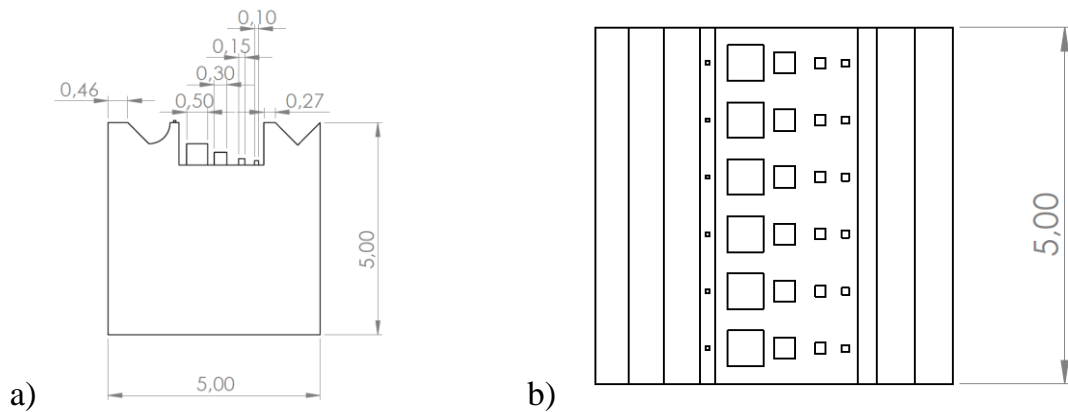


Abb. 10: Probekörper mit $d_L = 5 \text{ mm}$, $d_H = 5 \text{ mm}$ und mikrostrukturierter Oberfläche $d_{\text{Surface}} = 0,1 \dots 0,5 \text{ mm}$: a) Seitenansicht und b) Draufsicht

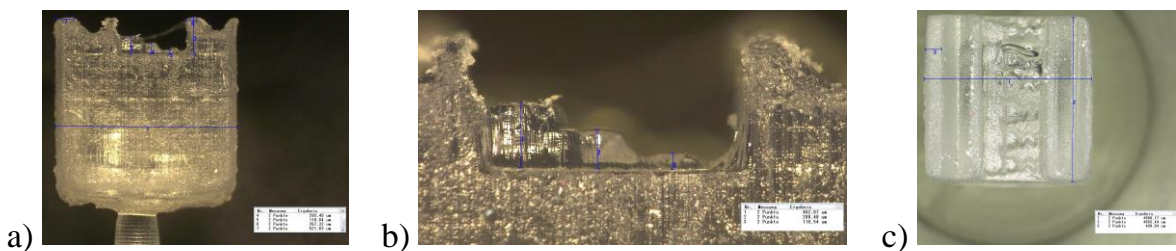


Abb. 11: Gedruckter Probekörper mit $d_L = 5 \text{ mm}$, $d_H = 5 \text{ mm}$ und mikrostrukturierter Oberfläche $d_{\text{Surface}} = 0,1 \dots 0,5 \text{ mm}$ mit dem Formlabs Form 2: a) Seitenansicht, b) Seitenansicht vergrößert und c) Draufsicht

4 Herstellung der Biegekanten mittels Spritzgussverfahren

Kunststoffe bestehen auf molekularer Ebene aus linearen, verzweigten Molekülketten. Aus Erdölfraktionierung gewonnene Monomere werden dabei mithilfe von Syntheseverfahren zu Polymeren aneinandergereiht, wobei zwischen Thermoplasten, Duromeren und Elastomeren unterschieden wird. Aus vielen einzelnen Bausteinen, den Monomeren, werden je nach Syntheseverfahren lange eindimensional kovalent gebundene (Thermoplaste) oder dreidimensional vernetzte Duromere mit spezifischen Eigenschaften erzeugt. Die Makromoleküle der Elastomere und Duromere sind untereinander räumlich weitmaschig bzw. engmaschig vernetzt und nach der Aushärtung nicht mehr schmelzbar. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Eigenschaften aus. Elastomere weisen eine charakteristische hohe Verformbarkeit mit hohem Rückstellvermögen aus, während Duromere im direkten Vergleich hart und spröde sind. Thermoplaste sind als fadenförmige Makromoleküle aufgebaut, die im kalten Zustand von ausgeprägten zwischenmolekularen Kräften dominiert werden. Bei Erwärmung werden die Nebenvalenzkräfte überwunden und die Molekülketten gleiten erst zähelastisch und bei höheren Temperaturen in einer Schmelze mit definierten viskosen Eigenschaften aneinander ab. Die Verarbeitung im Spritzgussverfahren basiert auf dieser Materialeigenschaft. Für die Entwicklung der

Faltsubstrate ist dieses Verfahren mit Blick auf den Automatisierungsgrad und hohe Stückzahlen pro Zeiteinheit besonders attraktiv und setzt ein geeignetes Werkzeug- und Temperierkonzept voraus. Die Bandbreite der zur Verfügung stehenden Thermoplaste und kombinierbaren Additive bieten ausreichend Optionen, eine Faltmontage für optische Systeme samt Integration von optischen Funktionsflächen und -elementen zu realisieren.

Basierend auf den Voruntersuchungen zur Herstellung einer Geometrie mit Biegekante im additiven Fertigungsverfahren wurde eine einfache Faltgeometrie modelliert, (Abb. 12-14) und ein entsprechendes Spritzgusswerkzeug (Abb. 15) konstruiert und getestet.

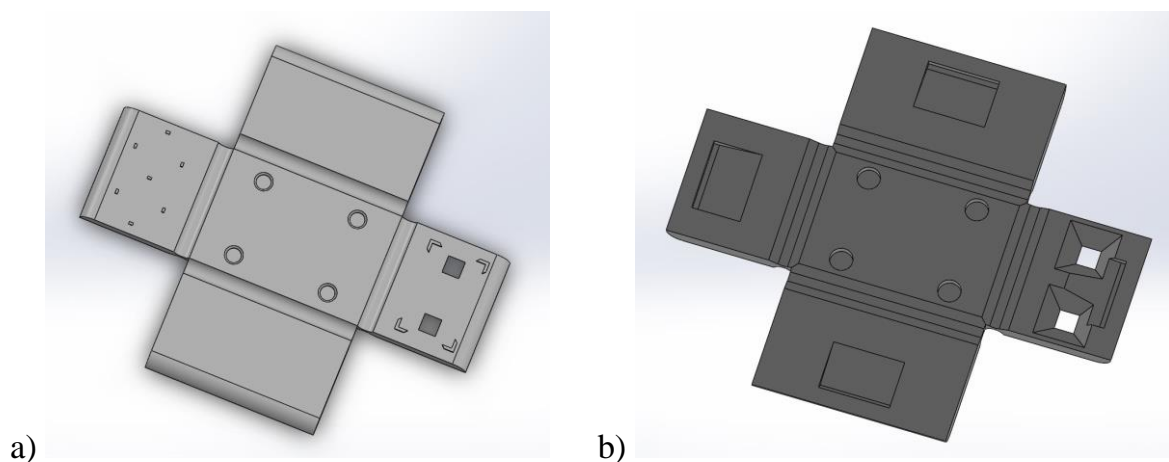


Abb. 12: Modellierung der Biegestruktur für planares Substrat mit Strukturen für optische Funktionsflächen: a) Ansicht von oben und b) Ansicht von unten

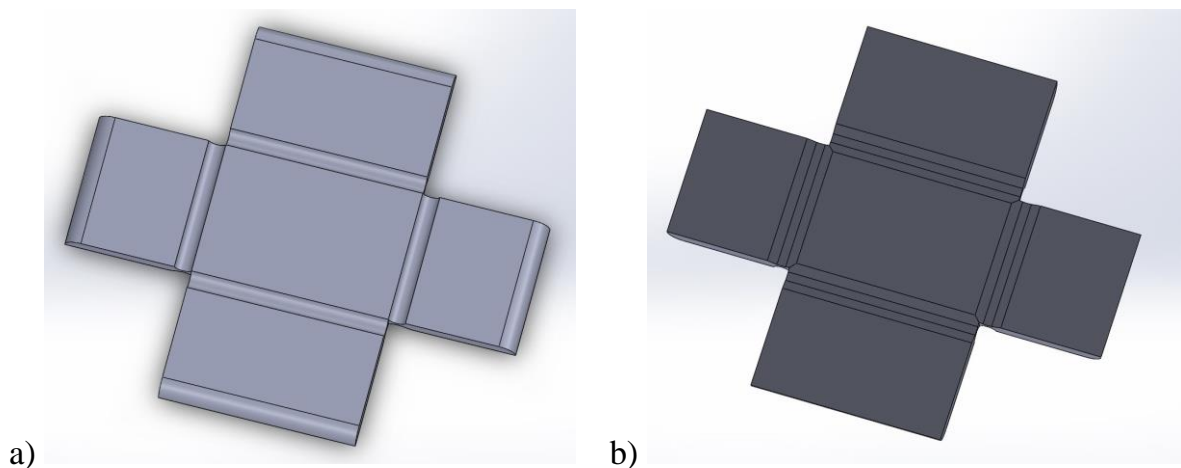


Abb. 13: Modellierung der Biegestruktur für planares Substrat in vereinfachter Variante: a) Ansicht von oben und b) Ansicht von unten

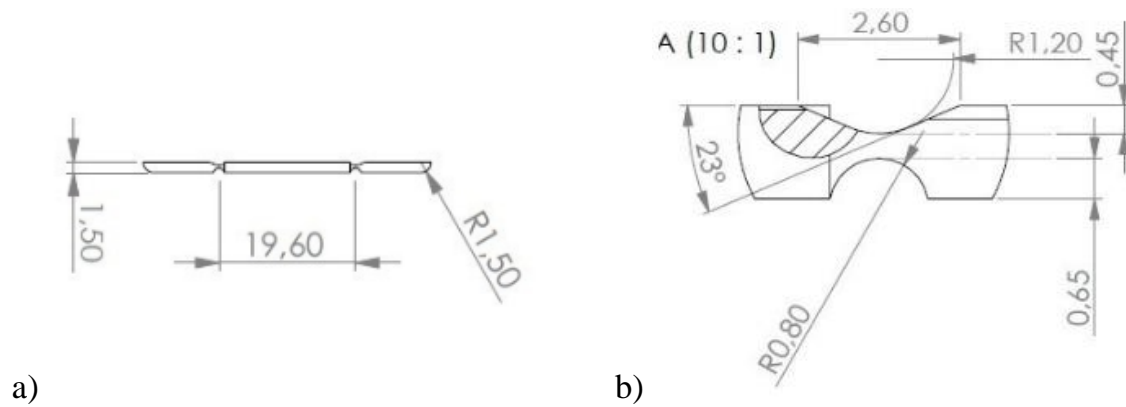


Abb. 14: Modellierung der Biegestruktur für planare Substrate mit $d_{\text{Knick}} = 0,4 \text{ mm}$: a) Seitenansicht und b) Detailansicht der Biegestelle

Mit diesem vereinfachten Werkzeugkonzept wurde gezeigt, dass es möglich ist, mittels Spritzgussverfahren knickbare Substrate auf Basis von Polypropylen und weiteren Polymeren für eine Faltmontage in hohen Stückzahlen und reproduzierbar zu fertigen (Abb. 15).

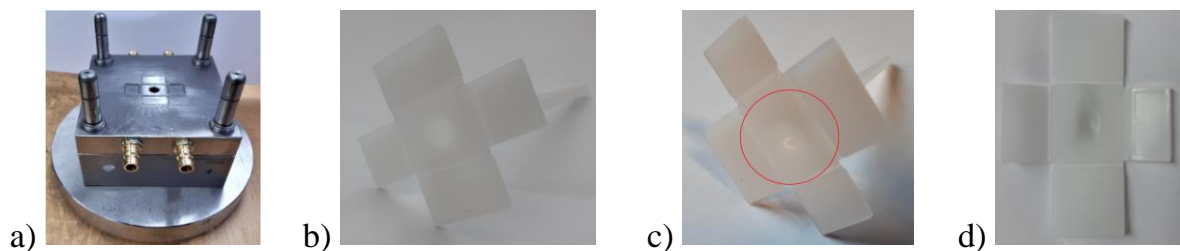


Abb. 15: Herstellung der Biegestruktur für planare Substrate mit $d_{\text{Knick}} = 0,4 \text{ mm}$: a) Werkzeug, b) Bauteil, c) prozessbedingte Einfallstelle und d) Weißbruch an den Scharnieren

Das Substrat aus Polypropylen lässt sich mehrere Male an den Filmscharnieren knicken, ohne dass diese abbrechen. Ein Auftritt von Weißbruch konnte jedoch nicht verhindert werden, ist aber für diese Anwendung nicht relevant. An den Biegekannten zeichnet sich bereits nach dem ersten Knickvorgang die sichtbare Auswirkung der mechanischen Überbeanspruchung ab. Da mehrmalige Beanspruchung durch Knicken stattfinden kann, ohne dass das Substrat am Filmscharnier bricht, ist dies nicht als Fehlschlag zu werten. Da das Substrat in seinem späteren Verwendungszweck nur einmal geknickt und in der aufgeklappten Form gehalten wird, ist auch keine Auslegung auf eine bestimmte Anzahl an Knickvorgängen vonnöten. Bei der Untersuchung der Knickstelle unter dem Mikroskop hat sich ebenfalls keine besondere Auffälligkeit an den Filmscharnieren aufgrund der Knickbeanspruchung ergeben. Die Dimensionsstabilität ist im Hinblick auf die geplanten Systemanwendungen ein wichtiger Kennwert, der noch genauer betrachtet werden muss.

5 Diskussion der Ergebnisse

Von praktischer Seite belegen verschiedene Demonstratorsysteme das Potenzial des hier skizzierten Ansatzes. Bereits das erste, vom Fraunhofer IPMS, mittels Faltmontage realisierte Kamerasystem mit einem einfachen Strahlengang auf Basis von zwei sphärischen Spiegeln erbrachte bei der Bildaufnahme eine Leistungsfähigkeit im Rahmen der Erwartungen (Abb. 16).

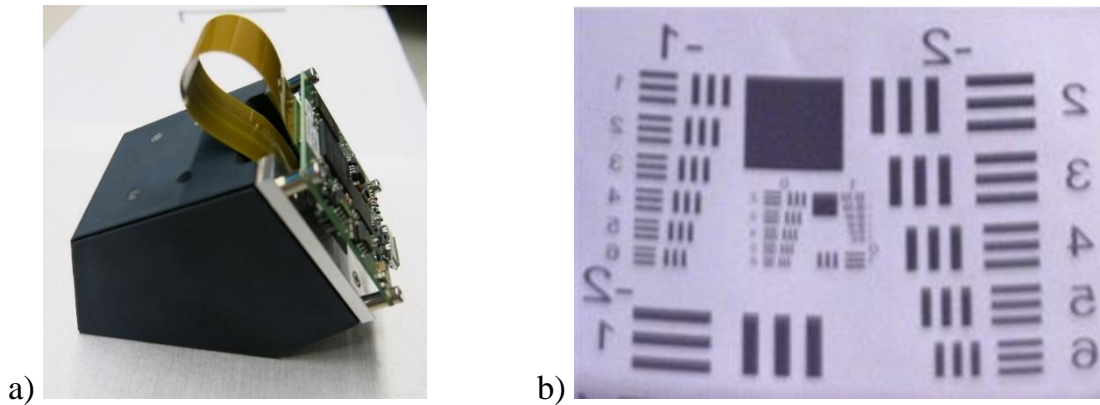


Abb. 16: Realisiertes Demonstratorsystem einer Faltkamera in Version 1: a) Strahlengang und b) aufgenommenes Testbild

Aufbauend auf diesem Prinzipnachweis wurden weitere Systeme entwickelt und erprobt: Die lichtstarke Kamera für thermisches Infrarot („Thermocam“) belegt das Potenzial des Systemansatzes eingehend. Die Thermocam kann mit überschaubarem Aufwand zu einer Multispektralkamera ausgebaut werden. Nach der Montage der Optiken in der Substratebene ist der Aufbau unkompliziert, der gewünschte Strahlengang liegt innerhalb der erwarteten Toleranzen und die Systemfunktionalität ist zuverlässig sichergestellt (Abb. 17).

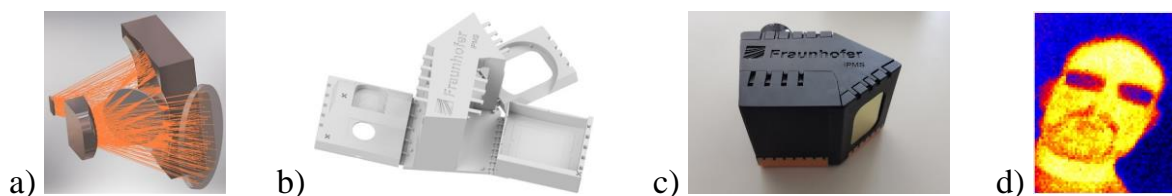


Abb. 17: Realisiertes Demonstratorsystem einer Faltkamera in Version 2: a) Weiterentwickelte Faltkamera mit Optikdesign, b) CAD-Design des Gehäuses, c) umgesetztes System und d) aufgenommenes Bild einer Wärmesignatur

Aufbauend auf der Entwicklung der Thermocam wurde für ein neuartiges Design für ein Spektrometer, das auf Scannerspiegeln als MEMS Aktuator basiert, ein CAD Modell für das System und ein Faltsubstrat erstellt (Abb. 18).

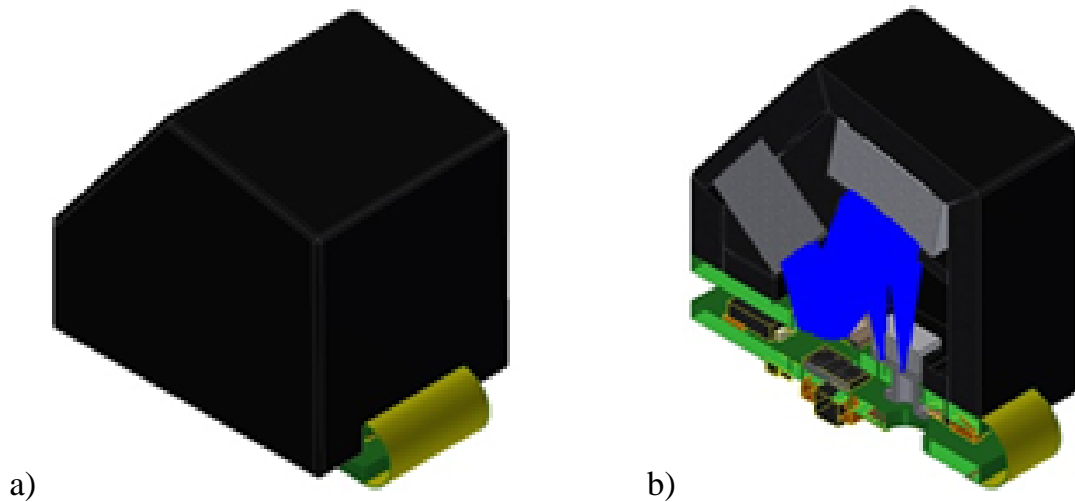


Abb. 18: Realisiertes Demonstratorsystem für ein Spektrometer: CAD Design für ein vereinfachtes Spektrometer mit a) Gehäuse und b) Innenleben

Das entsprechende Test- und Demonstrationssystem wurde unter Nutzung von Substraten aus dem 3D Druck realisiert und erfolgreich in Betrieb genommen (Abb. 19).

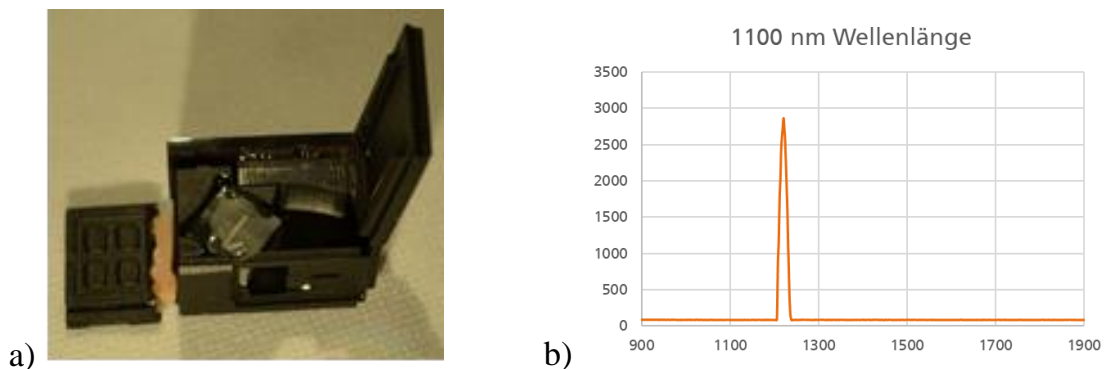


Abb.19: Realisiertes Demonstratorsystem für ein Spektrometer: a) Gefaltetes Spektrometer und b) aufgenommenes Linienprofil

Die bisherigen Forschungsergebnisse zeigen das hohe Potenzial der Kombination aus Mikrospritzguss und Faltmontage. Gleichzeitig wurden die komplexen Ansprüche an das Material und seinen Verarbeitungsprozess ersichtlich. Die Anforderungen hochpräzise Biegsamkeit, mechanische Stabilität, Substratgenauigkeit, optische Eigenschaften und kostengünstige Herstellbarkeit in großen Stückzahlen (Skalierbarkeit) sind aufeinander abzustimmen und nach Anwendungsfall für bestimmte Zielfunktionen zu optimieren. Auch wenn das Verfahren des Mikrospritzguss in der Komponenten- und Systemfertigung bereits etabliert ist, ergeben sich durch die Anforderungen der präzisen, qualitativ hochwertigen und reproduzierbaren Faltmontage sowie der Anwendung als komplexes Optiksyste neue Fragestellungen, die untersucht werden müssen, speziell

optische Eigenschaften, mechanische Stabilität und Präzision im Biegeverhalten. Hierbei müssen komplexe Materialsysteme, z.B. Mehrkomponentensysteme wie gefüllte Polymerwerkstoffe, Mehrlagen- oder Gradientensysteme, geprüft und verifiziert werden.

Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt allen Förderern und Unterstützern dieses interdisziplinären Projektvorhabens, insbesondere den Studierenden Mahmoud Sabiha und Karl Stein, die mit ihren hervorragenden Vorarbeiten und praktischen Versuchen die Grundlage für die angestrebte Innovation gelegt haben.

Das Projekt wird im Rahmen des Mittelstandsorientierten Eigenforschungsprojekt Programms (MEF) der Fraunhofer Gesellschaft unter Projektnummer 600890, Projekt Origami, gefördert.

Literatur

- [1] Anton, J.: „Evaluierung der optischen Eigenschaften von polymeren Materialien für die Faltmontage“. Bachelorarbeit, TU Ilmenau, 2020.
- [2] Sabiha, M.: „Design, Realisierung, Charakterisierung von 3D-gedruckten Substraten für den Faltmontageprozess“. Bachelorarbeit, TU Clausthal, Clausthal, 2019.
- [3] Stein, K.: „Evaluierung komplexer Biegestrukturen hergestellt mittels dem Spritzgussverfahren für die spätere Anwendung als miniaturisierte Optiksyste-me“. Bachelorarbeit, TU Clausthal, Clausthal, 2019.
- [4] Grüger, H.; Knobbe, J. und Pügner, T.: “Monolithically configured Spectroscopic instrument,” DE102018208684. Deutschland, Dez 5, 2019.
- [5] Grüger, H.; Knobbe, J. und Pügner, T.: „MEMS based NIR spectrometer with extended spectral range“ in MOEMS and Miniaturized Systems XVIII, San Francisco, United States, 2019, S. 7, doi: 10.1117/12.2509245.
- [6] Hopmann, C.; Menges, G.; Michaeli, W. und Mohren, P.: Spritzgießwerkzeuge: Auslegung, Bau, Anwendung, 7. Aufl. München: Hanser, 2018.
- [7] Vogel, H.: Konstruieren mit SolidWorks, 8. Aufl. München: Hanser, 2017.
- [8] Grüger, H.; Knobbe, J. und Sabiha, M. H.: „Investigation of mechanical and optical properties of 3D printed materials serving as substrate for place and bend assembly“ in MOEMS and Miniaturized Systems XVIII, San Francisco, United States, 2019, S. 26, doi: 10.1117/12.2509279.

- [9] Sdrenka, S.; Tetzlaff, T.; Kammerer, A.; Kriegel, R.; Ziegmann, G.: Untersuchung von strukturierten porösen Medien für den Stoffaustausch hergestellt mittels Additiver Fertigung. Berichtsband Clausthaler Zentrum für Materialtechnik: Fortschrittsberichte der Materialforschung und Werkstofftechnik / Bulletin of Materials Research and Engineering, (6): 194-210, Shaker Verlag, Aachen, 2018.
- [10] Sdrenka, S.; Tetzlaff, T.; Kammerer, A.; Bertram, J.; Ziegmann, G.: Analysis of complex geometric structures and packed porous media for the specific cell separation produced by additive manufacturing. Separation Techniques 2019, 8th Edition of International Conferences and Exhibition on Separation Technique, Dublin, IRE, 07/2019.
- [11] Sdrenka, S.; Ziemer, T.; Ziegmann, G.; Rembe, C.: Forschung und Technik: Biologisierung in Niedersachsen. TU Clausthal, Clausthaler Zentrum für Materialtechnik, 02/2019.
- [12] Bertram, J.; Sdrenka, S.: Additive Fertigung Meets Life Science, Niedersächsischer Life Science Tag 2019, BioRegionN, Hannover, 11/2019.

Autorenanschriften

Dipl.-Ing. Sebastian Sdrenka*

Technische Universität Clausthal

Clausthaler Zentrum für Materialtechnik

Leibnizstraße 9

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: +49 5323 72 3124

E-Mail: sebastian.sdrenka@tu-clausthal.de

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann

Technische Universität Clausthal

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Agricolastraße 6

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: +49 5323 72 2090

E-Mail: ziegmann@puk.tu-clausthal.de

Dr. rer. nat. Heinrich Grüger*

Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme

Maria-Reiche-Str. 2

01109 Dresden

Telefon: +49 351 8823 155

E-Mail: heinrich.grueger@ipms.fraunhofer.de